



(51) 国際特許分類6 H01S 3/18, H01L 33/00	A1	(11) 国際公開番号 WO98/39827 (43) 国際公開日 1998年9月11日(11.09.98)
(21) 国際出願番号 PCT/JP98/00828 (22) 国際出願日 1998年2月27日(27.02.98) (30) 優先権データ 特願平9/52596 1997年3月7日(07.03.97) JP 特願平9/65725 1997年3月19日(19.03.97) JP (71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) シャープ株式会社(SHARP KABUSHIKI KAJSHA)[JP/JP] 〒545-8522 大阪府大阪市阿倍野区長池町22番22号 Osaka, (JP) (72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてののみ) 奥村敏之(OKUMURA, Toshiyuki)[JP/JP] 〒632-0087 奈良県天理市二階堂上ノ庄町389-1-A201 Nara, (JP) (74) 代理人 弁理士 青山 葆, 外(AOYAMA, Tamotsu et al.) 〒540-0001 大阪府大阪市中央区城見1丁目3番7号 IMPビル 青山特許事務所 Osaka, (JP)		(81) 指定国 KR, US, 欧州特許 (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE). 添付公開書類 国際調査報告書
(54) Title: GALLIUM NITRIDE SEMICONDUCTOR LIGHT EMITTING ELEMENT WITH ACTIVE LAYER HAVING MULTIPLEX QUANTUM WELL STRUCTURE AND SEMICONDUCTOR LASER LIGHT SOURCE DEVICE (54) 発明の名称 多重量子井戸構造活性層を有する窒化ガリウム系半導体発光素子及び半導体レーザ光源装置 (57) Abstract A gallium nitride semiconductor laser element which is provided with an active layer (6) made of a nitride semiconductor containing at least indium and gallium between an n-type clad layer (5) and a p-type clad layer (9). The active layer (6) is composed of two quantum well layers (14) and a barrier layer (15) put between the layers (14) and constitutes the oscillating section of the semiconductor laser element. The preferable thicknesses of the quantum well layers (14) and the barrier layer (15) are not longer than 10 nm. In this semiconductor laser element, electrons and holes can be uniformly distributed in the two quantum well layers (14) and, in addition, the injection of electrons and holes into the quantum well layers (14) can be effectively performed when the electrons and the holes injected into the layers (14) have already been dissipated by recombination. Consequently, the semiconductor laser element has an excellent laser oscillation characteristic.		

(57) 要約

窒化ガリウム系半導体レーザ素子は、n型クラッド層（5）とp型クラッド層（9）との間に、少なくともインジウムとガリウムを含む窒化物半導体よりなる活性層（6）を備えている。活性層（6）は、2つの量子井戸層（14）と、これらの量子井戸層（14）の間に挟まれた障壁層（15）とからなり、半導体レーザ素子の発振部を構成している。量子井戸層（14）および障壁層（15）の厚さは好ましくは10nm以下である。この半導体レーザ素子では、2つの量子井戸層（14）に電子と正孔とを均一に分布させることができる上、再結合によって電子と正孔の消滅した量子井戸層内への電子と正孔の注入を効果的に行うことができる。この結果、この半導体レーザ素子は、良好なレーザ発振特性を有する。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に掲載されたPCT加盟国を同定するために使用されるコード（参考情報）

AL	アルバニア	FI	フィンランド	LT	リトアニア	SN	セネガル
AM	アルメニア	FR	フランス	LV	ラトヴィア	SD	スーダン
AT	オーストリア	GB	イギリス	MC	モナコ	TD	チャド
AZ	アゼルバイジャン	GG	ジョージア	MD	モルドバ	TG	タンザニア
BB	バハマ	GM	ギニア	MG	マダガスカル	TM	トルクメニスタン
BE	ベルギー	HN	ホンジュラス	MK	マケドニア共和国	TR	トルコ
BG	ブルガリア	NW	ニカラガ	ML	マリ	TT	トリニダード・トバゴ
BR	ブラジル	GR	ギリシャ	MN	モンゴル	TU	トルクメニスタン
BY	ベラルーシ	HU	ハンガリー	MR	モーリタニア	UA	ウクライナ
CA	カナダ	IE	アイルランド	MW	マラウイ	AC	アンティグア・バーブーダ
CC	ココス（キリング）諸島	IL	イスラエル	MX	メキシコ	CS	セルビア
CH	スイス	IS	アイスランド	NE	ネパール	SZ	スワジランド
CI	コートジボワール	IT	イタリア	NL	オランダ	VC	セント・ビンセント・グレナダ
CM	カメルーン	JP	日本	NO	ノルウェー	VG	ヴァージン諸島
CO	コロンビア	KE	ケニア	NZ	ニュージーランド	W	ウグンダ
CR	コスタリカ	KG	キルギス	PT	ポルトガル		
CU	キューバ	KZ	カザフスタン	RO	ルーマニア		
DE	ドイツ	KG	キルギス	RU	ロシア		
DK	デンマーク	LR	リベリア	SE	スウェーデン		
EE	エストニア	LS	レソト	SI	スロベニア		

明 細 書

多重量子井戸構造活性層を有する窒化ガリウム系半導体発光素子
及び半導体レーザ光源装置技術分野

本発明は半導体レーザ素子や半導体ダイオード素子等の窒化ガリウム系半導体発光素子、及び半導体レーザ光源装置に関し、特に、窒化物半導体よりなる多重量子井戸構造活性層を備えた発光素子に関する。

背景技術

紫外から緑色の波長領域での発光波長を有する半導体レーザ素子（LD）や発光ダイオード素子（LED）等の半導体材料として、窒化ガリウム系半導体（GaInAlN）が用いられている。この窒化ガリウム系半導体を用いた青色LDは、例えば、Applied Physics Letters, vol. 69, No. 10, p. 1477~1479に記載されており、その断面図を図19に示す。図20は図19のE部の拡大図である。

図19において、101はサファイア基板、102はGaNバッファ層、103はn-GaNコンタクト層、104はn-In_{0.05}Ga_{0.95}N層、105はn-Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層、106はn-GaNガイド層、107はIn_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層とIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層とからなる多重量子井戸構造活性層、108はp-Al_{0.2}Ga_{0.8}N層、109はp-GaNガイド層、110はp-Al_{0.05}Ga_{0.95}Nクラッド層、111はp-GaNコンタクト層、112はp側電極、113はn側電極、114はSiO₂絶縁膜である。ここで、多重量子井戸構造活性層107

は、図20に示されるように、3 nm厚の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層 117 が5層、6 nm厚の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層 118 が4層、の合計9層で構成され、量子井戸層と障壁層が交互に形成されている。

また、Applied Physics Letters, vol. 69, No. 20, p. 3034~3036には、量子井戸構造活性層を、交互に積層された4 nm厚の量子井戸層3層と8 nm厚の障壁層2層の合計5層で構成することが記載されている。

この他、特開平8-316528にも同様に窒化ガリウム系半導体を用いた青色LDが記載されているが、この従来技術の青色LDも、図19、20に示したものと同様に、5層以上の量子井戸層を持つ多重量子井戸構造活性層を用いている。

一方、窒化ガリウム系半導体を用いた青色LEDは、例えば、前記の特開平8-316528に記載されており、その断面図を図21に示す。図21において、121はサファイア基板、122はGa_{0.99}Nバッファ層、123はn-GaNコンタクト層、124はn-Al_{0.3}Ga_{0.7}N第2クラッド層、125はn-In_{0.01}Ga_{0.99}N第1クラッド層、126は3 nm厚のIn_{0.05}Ga_{0.95}N単一量子井戸構造活性層、127はp-In_{0.01}Ga_{0.99}N第1クラッド層、128はp-Al_{0.3}Ga_{0.7}N第2クラッド層、129はp-GaNコンタクト層、130はp側電極、131はn側電極である。このように窒化ガリウム系半導体を用いた青色LEDでは、1層のみの量子井戸層を有する活性層が用いられていた。

しかしながら従来の前記青色LD及び青色LED素子はそれぞれ以下のような問題点があった。

まず、青色LDに関しては、発振閾値電流値が10.0 mA以上と高く、光ディスク等の情報処理用として実用に供するためには大幅に発振閾値電流値を低減する必要がある。さらに光ディスク用としてLDを用いる場合、

データの読み出し時における雑音によるデータの読み出しエラーを防止するために周波数300MHz程度の高周波電流をLDに注入し、光出力を同じ周波数で変調する必要があるが、従来の青色LDでは高周波電流を注入しても光出力が変調されないため、データの読み出しエラーを生じるという問題があった。

また、青色LEDに関しては、すでに実用化されているものの、例えば、広い視野角でも明るく表示できる大型カラーディスプレイ等のように、さらに広範囲にわたる用途に青色LED素子を供していくためには、光出力の向上によるより一層高輝度なLEDの実現が望まれている。

さらに、従来の窒化ガリウム系LED素子では、注入電流を増すに従って発光波長のピーク値が大きく変動するという問題がある。例えば、窒化ガリウム系青色LEDでは、順方向電流を0.1mAから20mAまで増大すると発光波長のピーク値が7nmもシフトしてしまう。これは発光波長が長いLED素子で特に顕著であり、窒化ガリウム系緑色LEDでは、発光波長のピーク値が20nmもシフトしてしまう。このような素子をカラーディスプレイに用いると、このピーク波長のシフトのため、画像の明るさによって画像の色合いが変化してしまうという問題を生じていた。

発明の開示

本発明は以上のような事情に鑑みてなされたものであり、前記窒化ガリウム系半導体発光素子における課題を解決して、良好なレーザ発振特性を有する半導体レーザ素子、及び、高い光出力が得られる発光ダイオード素子を実現できる窒化ガリウム系半導体発光素子を提供することを主たる目的とする。

本発明のさらなる目的は、電流注入による波長シフトがない発光ダイオ

ード素子を実現できる窒化ガリウム系半導体発光素子を提供することである。

本発明の一実施形態に係る窒化ガリウム系半導体発光素子は、半導体基板と、少なくともインジウムとガリウムを含む窒化物半導体からなる量子井戸構造を有する活性層と、上記活性層を挟み込む第1のクラッド層および第2のクラッド層とを備え、前記活性層は、2つの量子井戸層と、前記量子井戸層の間に挟まれた1つの障壁層とからなる。

この窒化ガリウム系半導体発光素子を半導体レーザ素子として用いる場合には、前記活性層はこの半導体レーザ素子の発振部を形成する。そして、この半導体レーザ素子に電流を注入する駆動回路をさらに設けることにより、半導体レーザ光源装置が実現できる。一方、前記窒化ガリウム系半導体発光素子を半導体発光ダイオード素子として用いる場合には、前記活性層はこの半導体発光ダイオード素子の発光部を形成する。

このような本発明を見出すにあたって、本発明者は従来素子における前記課題の原因について詳細に調査を行い、以下のことが判明した。

まず 青色LDに関しては、量子井戸層として用いられる InGaIn 材料は、電子・正孔ともにその有効質量が大きいことと多数の結晶欠陥が存在していることにより電子や正孔の移動度が大幅に低下し、多重量子井戸構造活性層のすべての量子井戸層に電子と正孔とが均一に分布しなくなる。即ち、電子を注入するn型クラッド層側の量子井戸層2層程度にしか電子は注入されず、正孔を注入するp型クラッド層側の量子井戸層2層程度にしか正孔は注入されない。従って、量子井戸層が5層以上の多重量子井戸構造活性層では、電子と正孔とが同一の量子井戸層内に存在する割合が小さいため、電子と正孔の再結合による発光の効率が低下し、レーザ発振の閾値電流値を増大させてしまっている。

またこのように電子や正孔の移動度が小さいため量子井戸層の間での電子や正孔の移動が遅くなり、再結合によって電子・正孔が消滅した量子井戸層内へ新たに電子と正孔が注入されず、クラッド層に近接する量子井戸層に注入された電子・正孔がそのままその量子井戸層に存在し続けることになる。従って、注入電流を変調しても量子井戸層内に存在する電子と正孔の密度が変調されないことになり、このため高周波電流を注入しても光出力が変調されなくなっていた。

従って本発明の一実施形態では、少なくともインジウムとガリウムを含む窒化物半導体よりなる活性層における量子井戸層の層数を2とすることによって、すべての量子井戸層に電子と正孔とを均一に分布させるようにした。この結果、発光効率が向上して発振閾値電流値を低減させることができた。さらに、再結合によって電子・正孔が消滅した量子井戸層内への電子と正孔の注入が効果的に行われるので、高周波電流の注入により量子井戸層内に存在する電子と正孔の密度も変調され、その結果、光出力も変調されることが可能となった。

このようにすべての量子井戸層に電子と正孔とを均一に分布させるにあたっては、量子井戸層の層厚が厚すぎると、均一に電子と正孔を分布させることが阻害されてしまうため、量子井戸層の厚さは10 nm以下であることが好ましい。

さらに同様に、障壁層の層厚が厚すぎると、均一に電子と正孔を分布させることが阻害されてしまうため、障壁層の厚さは10 nm以下であることが好ましい。

一方青色LEDに関しては、現在実用化されている素子の電流－光出力特性は、図9に示されるように電流を注入していくにつれて飽和する傾向がある。従来の青色LEDでは量子井戸活性層は1層のみであり、注入さ

れた電子と正孔はともにこの1層の量子井戸層に存在するが、注入量を増大すると、量子井戸層を形成するInGa_N半導体材料の電子、正孔の有効質量が大きいため、注入された電子や正孔の運動量空間内で分布が大きくなり、発光効率が低下してしまう。そこで本発明のように、少なくともインジウムとガリウムを含む窒化物半導体よりなる多重量子井戸構造活性層における量子井戸層の層数を2とすることによって、注入された電子と正孔は2つの量子井戸層に分割されるため、量子井戸層1層当りに存在する電子と正孔の密度が低減され、運動量空間内で電子や正孔の分布を低減できた。その結果、電流-光出力特性における飽和する傾向は改善され、光出力の向上によるより高輝度な窒化ガリウム系LED素子の実現された。

さらに、本発明者が行った別の調査、実験の結果、障壁層の厚さが4nm以下であれば、量子井戸層の数を4まで増やしても、LEDについてもLEDについても以上と同様の結果が得られることがわかった。前記した文献Applied Physics Letters, vol. 69, No. 20, p. 3034~3036に記載された従来素子の量子井戸構造活性層は3つの量子井戸層を有するものであるが、InGa_N材料の電子や正孔の有効質量が大きい上、障壁層の層厚が8nmと厚いため、量子井戸層間で電子や正孔の波動関数の重なりがほとんど無くなってしまう。従って量子井戸層間での電子や正孔の移動がほとんど生じないため、電子と正孔の不均一な分布がよりいっそう引き起こされてしまっていた。しかし、障壁層の厚さを4nm以下にすることにより、量子井戸層が3層または4層あっても、量子井戸層間において電子と正孔の波動関数を確実に重ならせることができることが判明した。

また電流注入による波長シフトの問題も、障壁層の厚さを4nm以下にすることにより同時に解決されることが分かった。このような波長シフトの原因は次のように考えられる。すなわちInGa_N材料においては電子

や正孔の有効質量が大きいため、電子-正孔プラズマ効果が顕著になり、この効果によるエネルギーバンド端の変形が大きくなって電流注入による発光波長のピーク値のシフトが大きくなっている。従って、本発明のように、注入された電子と正孔が各量子井戸層に均等に分割されるようにして、量子井戸層1層当りに存在する電子と正孔の密度を低減することにより、電子-正孔プラズマ効果を抑制した結果、電流注入による波長シフトも低減されたと考えられる。

本発明のさらなる目的、特徴および利点は、添付の図面を参照しながら行う幾つかの実施形態の詳細な説明から理解できよう。

図面の簡単な説明

図1は本発明の第1実施形態に係る半導体レーザ素子を示す断面図である。

図2は図1のA部を拡大した断面図である。

図3は第1実施形態における閾値電流値の量子井戸層数依存性、及び光出力の変調可能な、注入電流の最大変調周波数の量子井戸層数依存性を示すグラフ図である。

図4は第1実施形態における光出力の変調可能な、注入電流の最大周波数の障壁層の厚さ依存性を示すグラフ図である。

図5は本発明の第2実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。

図6は本発明の第3実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。

図7は本発明の第4実施形態に係る半導体発光ダイオード素子を示す断面図である。

図 8 は図 7 の B 部を拡大した断面図である。

図 9 は本発明の第 4 実施形態に係る半導体発光ダイオード素子と従来の半導体発光ダイオード素子の、それぞれの電流－光出力特性を示すグラフである。

図 10 は本発明の第 5 の実施形態に係る半導体レーザ素子を示す断面図である。図 11 は図 10 の C 部を拡大して示す断面図である。

図 12 は第 5 実施形態における閾値電流値の量子井戸層数依存性、及び光出力の変調可能な、注入電流の最大変調周波数の量子井戸層数依存性を示すグラフ図である。

図 13 は量子井戸層数が 2 層、3 層、4 層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子の、光出力の変調可能な、注入電流の最大周波数の障壁層の厚さ依存性を示すグラフ図である。

図 14 は本発明の第 6 実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。

図 15 は本発明の第 7 実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。

図 16 は本発明の第 8 実施形態に係る半導体発光ダイオード素子を示す断面図である。

図 17 は図 16 の D 部を拡大して示す断面図である。

図 18 は本発明の第 8 実施形態に係る半導体発光ダイオード素子と従来の半導体発光ダイオード素子の、それぞれの電流－光出力特性を示すグラフである。

図 19 は従来の青色 LD の構造例を示す断面図である。

図 20 は図 19 の E 部を拡大して示す断面図である。

図 21 は従来の青色 LED の構造例を示す断面図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施形態を添付の図面に基づき説明する。

(第1実施形態)

図1は本発明の第1実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子を示す断面図であり、図2は図1中のA部を拡大した断面図である。この実施形態は2つの量子井戸層とこれらの間に挟まれた1つの障壁層とから量子井戸構造活性層を形成するものである。

図1、2において、1はc面を表面として有するサファイア基板、2はGa_{0.9}Nバッファ層、3はn-GaNコンタクト層、4はn-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層、5はn-GaNガイド層、6は2層のIn_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層14と1層のIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層15とからなる多重量子井戸構造活性層、7はAl_{0.2}Ga_{0.8}N蒸発防止層、8はp-GaNガイド層、9はp-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層、10はp-GaNコンタクト層、11はp側電極、12はn側電極、13はSiO₂絶縁膜である。なお、図面を簡単にするため、図1においては、複数層からなる前記量子井戸構造活性層6を単層のように描いている。他の実施形態の断面を示す図7、10、16においても同様である。

本実施形態において、サファイア基板1の表面はa面、r面、m面等の他の面方位であっても構わない。また、サファイア基板に限らずSiC基板、スピネル基板、MgO基板、Si基板、またはGaAs基板も用いることが出来る。特にSiC基板の場合はサファイア基板に比べて劈開しやすいため、劈開によるレーザ共振器端面の形成が容易であるという利点がある。バッファ層2はその上に窒化ガリウム系半導体をエピタキシャル成長させることが出来るものであればGa_{0.9}Nにこだわらず他の材料、例えば

AlNやAlGa_{0.3}N_{0.7}3元混晶を用いてもよい。

n型クラッド層4及びp型クラッド層9は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 以外のAl組成を持つAlGa_{0.3}N_{0.7}3元混晶でもよい。この場合Al組成を大きくすると活性層とクラッド層とのエネルギーギャップ差及び屈折率差が大きくなり、キャリアや光が活性層に有効に閉じ込められてさらに発振閾値電流の低減及び、温度特性の向上が図れる。またキャリアや光の閉じ込めが保持される程度でAl組成を小さくしていくと、クラッド層におけるキャリアの移動度が大きくなるため、半導体レーザ素子の素子抵抗を小さくできる利点がある。さらにこれらのクラッド層は微量に他の元素を含んだ4元以上の混晶半導体でもよく、n型クラッド層4とp型クラッド層9とで混晶の組成が同一でなくても構わない。

ガイド層5と8は、そのエネルギーギャップが、多重量子井戸構造活性層6を構成する量子井戸層のエネルギーギャップとクラッド層4、9のエネルギーギャップの間の値を持つような材料であればGa_{0.3}N_{0.7}にこだわらず他の材料、例えばInGa_{0.3}N_{0.7}、AlGa_{0.3}N_{0.7}等の3元混晶やInGaAlN等の4元混晶等を用いてもよい。またガイド層全体にわたってドナー又はアクセプターをドーピングする必要はなく、多重量子井戸構造活性層6側の一部のみをノンドープとしてもよく、さらにはガイド層全体をノンドープとしてもよい。この場合、ガイド層に存在するキャリアが少なくなり、自由キャリアによる光の吸収が低減されて、さらに発振閾値電流が低減できるという利点がある。

多重量子井戸構造活性層6を構成する2層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層14と1層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層15は、必要なレーザ発振波長に応じてその組成を設定すればよく、発振波長を長くしたい場合は量子井戸層14のIn組成を大きくし、短くしたい場合は量子井戸層14のIn

組成を小さくする。また量子井戸層14と障壁層15は、 InGaN 3元混晶に微量に他の元素、例えばA1、を含んだ4元以上の混晶半導体でもよい。さらに障壁層15は単に GaN を用いてもよい。

次に、図1と図2を参照して、前記窒化ガリウム系半導体レーザの作製方法を説明する。以下の説明ではMOCVD法（有機金属気相成長法）を用いた場合を示しているが、 GaN をエピタキシャル成長できる成長法であればよく、MBE法（分子線エピタキシャル成長法）やHDVPE（ハイドライド気相成長法）等の他の気相成長法を用いることもできる。

まず所定の成長炉内に設置された、c面を表面として有するサファイア基板1上に、トリメチルガリウム（TMG）とアンモニア（ NH_3 ）を原料に用いて、成長温度550℃で GaN バッファ層2を35nm成長させる。

次に成長温度を1050℃まで上昇させて、TMGと NH_3 、及びシランガス（ SiH_4 ）を原料に用いて、厚さ3μmの Siドープn-GaN コンタクト層3を成長する。さらに続けてトリメチルアルミニウム（TMA）を原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.7μmの $\text{Siドープn-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層4を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.05μmの Siドープn-GaN ガイド層5を成長する。

次に、成長温度を750℃に下げ、TMGと NH_3 、及びトリメチルインジウム（TMI）を原料に用いて、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層（厚さ5nm）14、 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層（厚さ5nm）15、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層（厚さ5nm）14を順次成長することにより多重量子井戸構造活性層（トータルの厚さ15nm）6を作成する。さらに続けてTMGとTMAと NH_3 を原料に用いて、成長温度は750℃のまま

で厚さ10nmの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 蒸発防止層7を成長する。

次に、再び成長温度を1050℃に上昇して、TMGと NH_3 、及びシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp_2Mg)を原料に用いて、厚さ0.05μmのMgドープp-GaNガイド層8を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.7μmのMgドープp- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.2μmのMgドープp-GaNコンタクト層10を成長して、窒化ガリウム系エピタキシャルウエハーを完成する。

その後、このウエハーを800℃の窒素ガス雰囲気中でアニールして、Mgドープのp型層を低抵抗化する。

さらに通常のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、200μm幅のストライプ状にp-GaNコンタクト層10の最表面から、n-GaNコンタクト層3が露出するまでエッチングを行う。次に、前記と同様のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、残ったp-GaNコンタクト層10の最表面に、5μm幅のストライプ状にリッジ構造を形成するようにp-GaNコンタクト層10、及びp- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9をエッチングする。

続いて、リッジRの側面とリッジR以外のp型層表面に厚さ200nmの SiO_2 絶縁膜13を形成する。この SiO_2 絶縁膜13とp-GaNコンタクト層10の表面にニッケルと金からなるp側電極11を形成し、エッチングにより露出したn-GaNコンタクト層3の表面にチタンとアルミニウムからなるn側電極12を形成して、窒化ガリウム系LDウエハーを完成する。

その後、このウエハーをリッジストライプに垂直な方向に劈開してレー

ザの共振器端面を形成し、さらに個々のチップに分割する。そして、各チップをステムにマウントし、ワイヤーボンディングにより各電極とリード端子とを接続して、窒化ガリウム系半導体レーザ素子を完成する。

以上のようにして作製された青色LD素子は、発振波長430nm、発振閾値電流40mAというレーザ特性が得られ、300MHz以上、最大周波数で1GHz程度の高周波電流の注入により光出力も十分変調されることが確認された。この結果、光ディスク用として本実施形態の青色LD素子を用いると、データの読み出しエラーを防止することができ、光ディスク用として使用可能な青色LD素子の実現できた。

図3には、窒化ガリウム系半導体レーザ素子において、量子井戸層の層数を1から5まで変化させたときの、閾値電流値と、光出力の変調が可能な注入電流の最大変調周波数の変化を表すグラフ図が示されている。各半導体レーザの構造は、量子井戸層の層数が異なること、及び量子井戸層数に応じて障壁層の層数が異なること以外は、本発明の第1実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子と同じである。この図からわかるように、発振閾値電流が低く、かつ、300MHz以上、例えば最大周波数で1GHz程度の高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが可能なものは、量子井戸層数が2である本発明の第1の実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子のみである。

なお、本実施形態では、多重量子井戸構造活性層6を構成する量子井戸層14と障壁層15の層厚をともに5nmとしたが、これらの層厚が同一である必要はなく、異なっても構わない。また2層の量子井戸層に均一に電子・正孔を注入するために、量子井戸層14と障壁層15の各層厚を10nm以下とすれば、本実施形態にこだわらず、他の層厚でも同等の効果を得られる。

図4には、量子井戸層数が2層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子において、障壁層の層厚を変化させたときの光出力の変調が可能な注入電流の最大変調周波数の変化を表すグラフ図が示されている。このときの半導体レーザの構造は、障壁層の層厚が異なること以外は第1実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子と同じである。この図から、障壁層の層厚を10nm以下とすれば、300MHz以上、最大1GHz程度の高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが可能であることがわかる。また、これは量子井戸層の場合も同様の結果であり、量子井戸層の層厚を10nm以下とすれば、300MHz以上、最大1GHz程度の高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが確認された。

また本実施形態では、多重量子井戸構造活性層6に接するように $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 蒸発防止層7を形成しているが、これは量子井戸層14が成長温度を上昇している間に蒸発してしまうことを防ぐためである。従って、量子井戸層14を保護するものであれば蒸発防止層7として用いることができ、他のAl組成を有する AlGaIn 3元混晶や GaN を用いてもよい。また、この蒸発防止層7にMgをドーピングしてもよく、この場合はp- GaN ガイド層8やp- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9から正孔が注入され易くなるという利点がある。さらに、量子井戸層14のIn組成が小さい場合は蒸発防止層7を形成しなくても量子井戸層14は蒸発しないため、特に蒸発防止層7を形成しなくても、本実施形態の窒化ガリウム系半導体レーザ素子の特性は損なわれない。

本実施形態では、リッジストライプ構造を形成して注入電流の狭窄を行っているが、電極ストライプ構造等の他の電流狭窄の手法を用いてもよい。また、本実施形態では劈開によりレーザの共振器端面を形成しているが、サファイア基板は硬くて劈開しにくい場合があるので、ドライエッチング

により共振器端面を形成することもできる。

さらに本実施形態では絶縁体であるサファイアを基板として用いたため、エッチングにより露出した n -Ga N コンタクト層3の表面に n 側電極12を形成しているが、 n 型導電性を有するSiC、Si、GaAs等を基板に用いれば、この基板の裏面に n 側電極12を形成してもよい。また、 p 型と n 型の構成を逆にしても構わない。

(第2実施形態)

図5は本発明の第2実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。図5中に示される半導体レーザ素子16は、本発明の第1実施形態で得られた量子井戸層数が2層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子を用いている。高周波駆動回路17は、通常の半導体部品を用いて構成されるものであり、高い周波数で半導体レーザ16への注入電流を変調し、光出力を変調させるための半導体レーザの駆動回路である。本実施形態では、注入電流の変調周波数を300MHzとした。第1実施形態で得られた窒化ガリウム系半導体レーザ素子では、注入電流の最大変調周波数は1GHz以上のものが得られており、300MHzの周波数でも光出力を十分変調させることができた。本実施形態を光ディスク用の光源として用いると、半導体レーザの光出力が十分変調されているのでレーザ光のコヒーレント性を低下させることができ、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減することができた。その結果、エラー無しで光ディスクからのデータの読み出しを行うことが可能となった。

なお、本実施形態では、注入電流の変調周波数を300MHzとしたが、レーザ光のコヒーレント性を低下させて、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減できるような周波数であれば、最大周波数1GHz程度まで、他の変調周波数で窒化物半導体レーザを駆動しても構わない。

(第3実施形態)

図6は本発明の第3実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示す回路図である。図6中に示される半導体レーザ素子18は、本発明の第1実施形態で得られた量子井戸層数が2層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子を用いているが、リッジ構造を形成する際のストライプ幅 w （図1参照）と、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9をエッチングする深さとを調整することによって、変調されていない一定電流を注入しても光出力が変調されている自励発振型の半導体レーザとなっている。ここでは、ストライプ幅 w を $3\mu\text{m}$ 、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9のエッチングの際の残し膜厚 d （図1参照）を $0.2\mu\text{m}$ とした。なお、これらのストライプ幅とエッチングの際の残し膜厚とは本具体例の値に限定されるものではなく、ストライプ幅として1乃至 $5\mu\text{m}$ 、 p 型クラッド層9の残し膜厚としては 0.05 乃至 $0.5\mu\text{m}$ であればよい。このように作製された自励発振型の窒化ガリウム系半導体レーザ素子における光出力の変調周波数は、 800MHz であった。

第3実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子では、量子井戸層数を2層としたことにより、量子井戸層内に存在する電子と正孔の密度が変調されやすくなっている。従って、注入電流を変調して電子と正孔の密度を変調することによって光出力を変調するだけでなく、変調されていない一定電流の注入でも電子と正孔の密度が変調されて光出力が変調される自励発振型の半導体レーザの作製も容易にでき、高い周波数で光出力が変調されることが可能となった。

定電流駆動回路19は、通常の半導体部品を用いて構成されるものであり、一定電流を注入するための半導体レーザの駆動回路である。本実施形態を光ディスク用の光源として用いると、半導体レーザの光出力が十分変

調されているのでレーザ光のコヒーレント性を低下させることができ、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減することができた。その結果、エラー無しで光ディスクからのデータの読み出しを行うことが可能となった。

なお、本第3実施形態で用いた窒化ガリウム系半導体レーザ素子18は、リッジ構造を形成する際のストライプ幅 w と、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9をエッチングする深さとを調整することによって自励発振型の半導体レーザとしたが、通常のGaAs系半導体レーザ等で用いられているように、活性層の近傍に可飽和吸収層（図示せず）を設置して自励発振型の半導体レーザとしても構わない。

（第4実施形態）

図7は本発明の第4実施形態に係る窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子を示す断面図であり、図8は図7中のB部を拡大した断面図である。

この図において、21はc面を表面として有するサファイア基板、22はGa_{0.9}Nバッファ層、23はn-GaNコンタクト層、24はn-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層、25はn-GaNガイド層、26は2層のIn_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層34と1層のIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層35とからなる多重量子井戸構造活性層、27はAl_{0.2}Ga_{0.8}N蒸発防止層、28はp-GaNガイド層、29はp-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層、30はp-GaNコンタクト層、31はp側電極、32はn側電極である。

本実施形態において、サファイア基板21の表面はa面、r面、m面等の他の面方位であっても構わない。また、サファイア基板に限らずSiC基板、スピネル基板、MgO基板、またはSi基板も用いることが出来る。特にSiC基板の場合はサファイア基板に比べて劈開しやすいため、LED素子をチップ分割する作業が容易に行えるという利点がある。バッファ

層 22 はその上に窒化ガリウム系半導体をエピタキシャル成長させることが出来るものであれば GaN にこだわらず他の材料、例えば AlN や AlGaInN 3 元混晶を用いてもよい。

n 型クラッド層 24 及び p 型クラッド層 29 は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ 以外の Al 組成を持つ AlGaInN 3 元混晶や、単に GaN を用いてもよい。この場合 Al 組成を大きくすると活性層とクラッド層とのエネルギーギャップ差が大きくなり、キャリアが活性層に有効に閉じ込められて温度特性の向上が図れる。またキャリアの閉じ込めが保持される程度で Al 組成を小さくしていくと、クラッド層におけるキャリアの移動度が大きくなるため、発光ダイオード素子の素子抵抗を小さくできる利点がある。さらにこれらのクラッド層は微量に他の元素を含んだ 4 元以上の混晶半導体でもよく、n 型クラッド層 24 と p 型クラッド層 29 とで混晶の組成が同一でなくても構わない。

ガイド層 25 と 28 は、そのエネルギーギャップが、多重量子井戸構造活性層 26 を構成する量子井戸層のエネルギーギャップとクラッド層 24、29 のエネルギーギャップの間の値を持つような材料であれば GaN にこだわらず他の材料、例えば InGaInN、AlGaInN 等の 3 元混晶や InGaAlN 等の 4 元混晶等を用いてもよい。またガイド層全体にわたってドナー又はアクセプターをドーピングする必要はなく、多重量子井戸構造活性層 26 側の一部のみをノンドープとしてもよく、さらにはガイド層全体をノンドープとしてもよい。この場合、ガイド層に存在するキャリアが少なくなり、自由キャリアによる光の吸収が低減されて、さらに光出力が向上するという利点がある。また、ガイド層 25、28 には、n 型クラッド層 24 と p 型クラッド層 29 からそれぞれ電子と正孔を多重量子井戸構造活性層 26 へ注入しやすくするという利点があるが、特にガイド層 25、

28を設けなくてもLED素子特性が大きく悪化することはないので、ガイド層25、28はなくても構わない。

多重量子井戸構造活性層26を構成する、2層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層34と1層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層35は、必要な発光波長に応じてその組成を設定すればよく、発光波長を長くしたい場合は量子井戸層34のIn組成を大きくし、短くしたい場合は量子井戸層34のIn組成を小さくする。また量子井戸層34と障壁層35は、 InGaN 3元混晶に微量に他の元素、例えばAl、を含んだ4元以上の混晶半導体でもよい。さらに障壁層35は単に GaN を用いてもよい。

次に、図7と図8を参照して前記窒化ガリウム系半導体発光ダイオードの作製方法を説明する。以下の説明ではMOCVD法（有機金属気相成長法）を用いた場合を示しているが、 GaN をエピタキシャル成長できる成長法であればよく、MBE法（分子線エピタキシャル成長法）やHDVPE（ハイドライド気相成長法）等の他の気相成長法を用いることもできる。

まず所定の成長炉内に設置された、c面を表面として有するサファイア基板21上に、TMGと NH_3 を原料に用いて、成長温度550℃で GaN バッファ層22を35nm成長させる。

次に成長温度を1050℃まで上昇させて、TMGと NH_3 、及び SiH_4 を原料に用いて、厚さ3μmのSiドープn- GaN コンタクト層23を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.3μmのSiドープn- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層24を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.05μmのSiドープn- GaN ガイド層25を成長する。

次に、成長温度を750℃に下げ、TMGと NH_3 、及びTMIを原料

に用いて、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層（厚さ3 nm）34、 $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層（厚さ5 nm）35、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層（厚さ3 nm）34を順次成長することにより多重量子井戸構造活性層（トータルの厚さ11 nm）26を作成する。さらに続けてTMGとTMAと NH_3 を原料に用いて、成長温度は750℃のままで厚さ10 nmの $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 蒸発防止層27を成長する。

次に、再び成長温度を1050℃に上昇して、TMGと NH_3 、及び Cp_2Mg を原料に用いて、厚さ0.05 μm のMgドープp-GaNガイド層28を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.3 μm のMgドープp- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層29を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.2 μm のMgドープp-GaNコンタクト層30を成長して、窒化ガリウム系エピタキシャルウエハーを完成する。

その後、このウエハーを800℃の窒素ガス雰囲気中でアニールして、Mgドープのp型層を低抵抗化する。

さらに通常のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、LED素子作製のために所定の領域に、p-GaNコンタクト層30の最表面から、n-GaNコンタクト層23が露出するまでエッチングを行う。

続いて、p-GaNコンタクト層30の表面にニッケルと金からなるp側電極31を形成し、エッチングにより露出したn-GaNコンタクト層23の表面にチタンとアルミニウムからなるn側電極32を形成して、窒化ガリウム系LEDウエハーを完成する。

その後、このウエハーを個々のチップに分割する。そして、各チップをステムにマウントし、ワイヤーボンディングにより各電極とリード端子とを接続して、窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子を完成する。

以上のようにして作製された青色LED素子は、順方向電流20mAで、発光波長430nm・光出力6mWという発光特性が得られた。また図9に示されるように、電流－光出力特性は高い注入電流においても光出力は飽和することではなく、従来のLED素子に比べて特性が改善された。

なお、本実施形態では、多重量子井戸構造活性層26を構成する量子井戸層34と障壁層35の層厚をそれぞれ3nm及び5nmとしたが、これらの層厚は、2層の量子井戸層に均一に電子・正孔を注入するために、量子井戸層34と障壁層35の各層厚を10nm以下とすれば、本実施形態にこだわらず、他の層厚でも同等の効果が得られる。

また本実施形態では、多重量子井戸構造活性層26に接するように $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 蒸発防止層27を形成しているが、これは量子井戸層34が成長温度を上昇している間に蒸発してしまうことを防ぐためである。従って、量子井戸層34を保護するものであれば蒸発防止層27として用いることができ、他のAl組成を有する AlGaIn 3元混晶や GaN を用いてもよい。また、この蒸発防止層27にMgをドーピングしてもよく、この場合はp- GaN ガイド層28やp- $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層29から正孔が注入され易くなるという利点がある。さらに、量子井戸層34のIn組成が小さい場合は蒸発防止層27を形成しなくても量子井戸層34は蒸発しないため、特に蒸発防止層27を形成しなくても、本実施形態の窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子の特性は損なわれない。

(第5実施形態)

図10は本発明の第5実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子を示す断面図であり、図11は図10中のC部を拡大した断面図である。この窒化ガリウム系半導体レーザ素子は、多重量子井戸構造活性層46の構造以外は、第1実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子と同じ

であるため、多重量子井戸構造活性層46以外の層については図10、11で使用したのと同じ参照番号を用いて、詳細な説明を省略する。なお、第1実施形態で説明した種々の変形や代替物およびそれらから得られる効果等については、本実施形態についてもはてはまることは言うまでもない。

本実施形態では、多重量子井戸構造活性層46は、4層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層54と3層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層55とが交互に積層されて形成されている。各障壁層55の厚さは4nm以下である。

多重量子井戸構造活性層46を構成する4層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層54と3層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層55は、必要なレーザ発振波長に応じてその組成を設定すればよく、発振波長を長くしたい場合は量子井戸層54の In 組成を大きくし、短くしたい場合は量子井戸層54の In 組成を小さくする。また量子井戸層54と障壁層55は、 InGaIn 3元混晶に微量に他の元素、例えばA1、を含んだ4元以上の混晶半導体でもよい。さらに障壁層55は単に GaN を用いてもよい。さらに、量子井戸層54の層数は2層または3層でも構わない。ただし障壁層55の層厚は、いずれの材料・量子井戸層数においても4nm以下に設定し、量子井戸層間で電子や正孔の波動関数の重なりが生じるようにしておく。

次に、図10と図11を参照して前記窒化ガリウム系半導体レーザの作製方法を説明する。以下の説明ではMOCVD法（有機金属気相成長法）を用いた場合を示しているが、 GaN をエピタキシャル成長できる成長法であればよく、MBE法（分子線エピタキシャル成長法）やHDVPE（ハイドライド気相成長法）等の他の気相成長法を用いることもできる。

まず所定の成長炉内に設置された、c面を表面として有するサファイア基板1上に、トリメチルガリウム（TMG）とアンモニア（ NH_3 ）を原料に用いて、成長温度550℃で GaN バッファ層2を35nm成長させ

る。

次に成長温度を1050℃まで上昇させて、TMGとNH₃、及びシランガス(SiH₄)を原料に用いて、厚さ3μmのSiドープn-GaNコンタクト層3を成長する。さらに続けてトリメチルアルミニウム(TMA)を原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.7μmのSiドープn-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層4を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.05μmのSiドープn-GaNガイド層5を成長する。

次に、成長温度を750℃に下げ、TMGとNH₃、及びトリメチルインジウム(TMI)を原料に用いて、In_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層(厚さ3nm)54とIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層(厚さ2nm)55の交互成長を3回繰り返し、最後にIn_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層(厚さ3nm)54を1層だけ成長することにより多重量子井戸構造活性層(トータルの厚さ18nm)46を作成する。さらに続けてTMGとTMAとNH₃を原料に用いて、成長温度は750℃のままで厚さ10nmのAl_{0.2}Ga_{0.8}N蒸発防止層7を成長する。

次に、再び成長温度を1050℃に上昇して、TMGとNH₃、及びシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp₂Mg)を原料に用いて、厚さ0.05μmのMgドープp-GaNガイド層8を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.7μmのMgドープp-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層9を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.2μmのMgドープp-GaNコンタクト層10を成長して、窒化ガリウム系エピタキシャルウェハーを完成する。

その後、このウェハーを800℃の窒素ガス雰囲気中でアニールして、

Mgドープのp型層を低抵抗化する。

さらに通常のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、 $200\mu\text{m}$ 幅のストライプ状にp-GaNコンタクト層10の最表面から、n-GaNコンタクト層3が露出するまでエッチングを行う。次に、前記と同様のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、残ったp-GaNコンタクト層10の最表面に、 $5\mu\text{m}$ 幅のストライプ状にリッジ構造を形成するようにp-GaNコンタクト層10・p-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層9をエッチングする。

続いて、リッジの側面とリッジ以外のp型層表面に厚さ 200nm のSiO₂絶縁膜13を形成する。このSiO₂絶縁膜13とp-GaNコンタクト層10の表面にニッケルと金からなるp側電極11を形成し、エッチングにより露出したn-GaNコンタクト層3の表面にチタンとアルミニウムからなるn側電極12を形成して、窒化ガリウム系LDウエハーを完成する。

その後、このウエハーをリッジストライプに垂直な方向に劈開してレーザの共振器端面を形成し、さらに個々のチップに分割する。そして、各チップをステムにマウントし、ワイヤーボンディングにより各電極とリード端子とを接続して、窒化ガリウム系半導体レーザ素子を完成する。

以上のようにして作製された青色LD素子は、発振波長 430nm 、発振閾値電流 40mA というレーザ特性が得られ、 300MHz 以上 1GHz 程度までの高周波電流の注入により光出力も変調されることが確認された。この結果、光ディスク用として本実施例の青色LD素子を用いると、データの読み出しエラーを防止することができ、光ディスク用として使用可能な青色LD素子の実現できた。

図12には、窒化ガリウム系半導体レーザ素子において、量子井戸層の

層数を1から5まで変化させたときの、閾値電流値と、光出力の変調が可能な注入電流の最大変調周波数の変化を表すグラフ図が示されている。各半導体レーザの構造は、量子井戸層の層数が異なること、及び量子井戸層数に応じて障壁層の層数が異なること以外は本実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子と同じである。この図からわかるように、発振閾値電流が低く、かつ、300MHz以上1GHz程度までの高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが可能なものは、量子井戸層数が2以上4以下である本発明の窒化ガリウム系半導体レーザ素子のみである。

なお本実施形態では、多重量子井戸構造活性層46を構成する量子井戸層54と障壁層55の層厚をそれぞれ3nmと2nmとしたが、これらの層厚は、量子井戸層54の層厚を10nm以下とし障壁層55の層厚を4nm以下として、各量子井戸層に均一に電子・正孔を注入するようにすれば、本実施例にこだわらず、他の層厚でも同等の効果が得られる。図13には、量子井戸層数が2層、3層、4層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子において、障壁層の層厚を変化させたときの光出力の変調が可能な注入電流の最大変調周波数の変化を表すグラフ図が示されている。このときの半導体レーザの構造は、障壁層の層厚が異なること以外は本実施形態に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子と同じである。この図から、障壁層の層厚を4nm以下とすれば、300MHz以上1GHz程度までの高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが可能であることがわかる。また、量子井戸層厚の場合も同様に、井戸層厚を10nm以下とすれば、1GHz程度の高周波電流の注入でも光出力が十分変調されることが可能であることが確認された。

(第6実施形態)

図14は本発明の第6実施形態に係る半導体レーザ素子と駆動回路を示

す回路図である。図14中に示される半導体レーザ素子66は、本発明の第5実施形態で得られた量子井戸層数が4層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子を用いている。高周波駆動回路17は第2実施形態で使用了なものと同様の構成のものであり、高い周波数で半導体レーザ66への注入電流を変調し、光出力を変調させるための半導体レーザの駆動回路である。本実施形態では、注入電流の変調周波数を300MHzとした。第5実施形態で得られた窒化ガリウム系半導体レーザ素子では、注入電流の最大変調周波数は1GHz以上のものが得られており、300MHzの周波数でも光出力を十分変調させることができた。本実施形態を光ディスク用の光源として用いると、半導体レーザの光出力が十分変調されているのでレーザ光のコヒーレント性を低下させることができ、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減することができた。その結果、エラー無しで光ディスクからのデータの読み出しを行うことが可能となった。

なお、本実施形態では、注入電流の変調周波数を300MHzとしたが、レーザ光のコヒーレント性を低下させて、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減できるような周波数であればよく、300MHz以上最大1GHzまでの他の変調周波数で窒化物半導体レーザを駆動しても構わない。

(第7実施形態)

図15は本発明の第7実施形態に係る半導体レーザ素子と定電流駆動回路を示す回路図である。図15中に示される半導体レーザ素子68は、本発明の第5実施形態で得られた量子井戸層数が4層である窒化ガリウム系半導体レーザ素子を用いているが、リッジ構造を形成する際のスライブ幅と、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層9をエッチングする深さとを調整することによって、変調されていない一定電流を注入しても光出力が変調

されている自励発振型の半導体レーザとなっている。ここでは、ストライプ幅を $3\ \mu\text{m}$ 、 $\text{p-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層 9 のエッチングの際の残し膜厚を $0.2\ \mu\text{m}$ とした。なおこれらのストライプ幅とエッチングの残し膜厚とは、本実施形態の値に限定されるものではなく、ストライプ幅としては $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 、 p 型クラッド層のエッチングの際の残し膜厚としては $0.05\sim 0.5\ \mu\text{m}$ であればよい。このようにして作製された自励発振型の窒化ガリウム系半導体レーザ素子における光出力の変調周波数は、 800MHz であった。

本発明に係る窒化ガリウム系半導体レーザ素子では、量子井戸層数を 2 以上 4 以下とし、障壁層の層厚を 4nm 以下に設定したことにより、量子井戸層内に存在する電子と正孔の密度が変調されやすくなっている。従って、注入電流を変調して電子と正孔の密度を変調することによって光出力を変調するだけでなく、変調されていない一定電流の注入でも電子と正孔の密度が変調されて光出力が変調される自励発振型の半導体レーザの作製も容易にでき、高い周波数で光出力が変調されることが可能となった。

定電流駆動回路 19 は、第 3 実施形態で使用したものと同様のものであり、一定電流を注入するための半導体レーザの駆動回路である。本発明を光ディスク用の光源として用いると、半導体レーザの光出力が十分変調されているのでレーザ光のコヒーレント性を低下させることができ、ディスク面からのレーザ光の戻り光による雑音を低減することができた。その結果、エラー無しで光ディスクからのデータの読み出しを行うことが可能となった。

なお、本実施形態で用いた窒化ガリウム系半導体レーザ素子 18 は、リッジ構造を形成する際のストライプ幅と、 $\text{p-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ クラッド層 9 をエッチングする深さとを調整することによって自励発振型の半導体レ

ーザとしたが、通常のGaAs系半導体レーザ等で用いられているように、活性層の近傍に可飽和吸収層（図示せず）を設置して自励発振型の半導体レーザとしても構わない。

（第8実施形態）

図16は本発明の第8実施形態に係る窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子を示す断面図であり、図17は図16中のD部を拡大した断面図である。この窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子は、多重量子井戸構造活性層76の構造以外は、第4実施形態の窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子と同じであるため、多重量子井戸構造活性層76以外の層については図7、8で使用したのと同じ参照番号を用いて、詳細な説明を省略する。なお、第4実施形態で説明した種々の変形や代替物およびそれから得られる効果等については、本実施形態についてもはてはまることは言うまでもない。

本実施形態では、多重量子井戸構造活性層76は、3層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層84と2層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層85とが交互に積層されて形成されている。各障壁層85の厚さは4nm以下である。

多重量子井戸構造活性層76を構成する、3層の $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{N}$ 量子井戸層84と2層の $\text{In}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}$ 障壁層85は、必要な発光波長に応じてその組成を設定すればよく、発光波長を長くしたい場合は量子井戸層84のIn組成を大きくし、短くしたい場合は量子井戸層84のIn組成を小さくする。また量子井戸層84と障壁層85は、InGa₃N三元混晶に微量に他の元素、例えばAl、を含んだ4元以上の混晶半導体でもよい。さらに障壁層85は単にGaNを用いてもよい。さらに、量子井戸層の層数は2層または4層でも構わない。ただし障壁層85の層厚は、いずれの材料・量子井戸層数においても4nm以下に設定し、量子井戸層間で

電子や正孔の波動関数の重なりが生じるようにしておく。

次に、図16と図17を参照して前記窒化ガリウム系半導体発光ダイオードの作製方法を説明する。以下の説明ではMOCVD法（有機金属気相成長法）を用いた場合を示しているが、GaNをエピタキシャル成長できる成長法であればよく、MBE法（分子線エピタキシャル成長法）やHDVPE（ハイドライド気相成長法）等の他の気相成長法を用いることもできる。

まず所定の成長炉内に設置された、c面を表面として有するサファイア基板21上に、TMGとNH₃を原料に用いて、成長温度550℃でGaNバッファ層22を35nm成長させる。

次に成長温度を1050℃まで上昇させて、TMGとNH₃、及びSiH₄を原料に用いて、厚さ3μmのSiドープn-GaNコンタクト層23を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.3μmのSiドープn-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層24を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.05μmのSiドープn-GaNガイド層25を成長する。

次に、成長温度を750℃に下げ、TMGとNH₃、及びTMIを原料に用いて、In_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層（厚さ3nm）84とIn_{0.05}Ga_{0.95}N障壁層（厚さ4nm）85の交互成長を2回繰り返し、最後にIn_{0.2}Ga_{0.8}N量子井戸層（厚さ3nm）84を1層だけ成長することにより多重量子井戸構造活性層（トータルの厚さ17nm）76を作成する。さらに続けてTMGとTMAとNH₃を原料に用いて、成長温度は750℃のままで厚さ10nmのAl_{0.2}Ga_{0.8}N蒸発防止層27を成長する。

次に、再び成長温度を1050℃に上昇して、TMGとNH₃、及びC

p₂Mgを原料に用いて、厚さ0.05 μmのMgドープp-GaNガイド層28を成長する。さらに続けてTMAを原料に加え、成長温度は1050℃のままで厚さ0.3 μmのMgドープp-Al_{0.1}Ga_{0.9}Nクラッド層29を成長する。続けて、TMAを原料から除いて、成長温度は1050℃のままで厚さ0.2 μmのMgドープp-GaNコンタクト層30を成長して、窒化ガリウム系エピタキシャルウエハーを完成する。

その後、このウエハーを800℃の窒素ガス雰囲気中でアニールして、Mgドープのp型層を低抵抗化する。

さらに通常のフォトリソグラフィーとドライエッチング技術を用いて、LED素子作製のために所定の領域に、p-GaNコンタクト層30の最表面から、n-GaNコンタクト層23が露出するまでエッチングを行う。

続いて、p-GaNコンタクト層30の表面にニッケルと金からなるp側電極31を形成し、エッチングにより露出したn-GaNコンタクト層23の表面にチタンとアルミニウムからなるn側電極32を形成して、窒化ガリウム系LEDウエハーを完成する。

その後、このウエハーを個々のチップに分割する。そして、各チップをステムにマウントし、ワイヤーボンディングにより各電極とリード端子とを接続して、窒化ガリウム系半導体発光ダイオード素子を完成する。

以上のようにして作製された青色LED素子は、順方向電流20 mAで、発光波長430 nm・光出力6 mWという発光特性が得られた。また図18に示されるように、電流-光出力特性は高い注入電流においても光出力は飽和することはなく、従来のLED素子に比べて特性が改善された。さらに、電流注入による波長シフトも改善され、従来の青色LED素子で約7 nmのシフト量が、本発明では2 nmに低減された。

なお、本実形態では、多重量子井戸構造活性層76を構成する量子井戸

層 8 4 と障壁層 8 5 の層厚をそれぞれ 3 nm 及び 4 nm としたが、これらの層厚は、量子井戸層 8 4 の層厚を 10 nm 以下とし障壁層 8 5 の層厚を 4 nm 以下として、各量子井戸層に均一に電子・正孔を注入するようにすれば、本実施形態にこだわらず、他の層厚でも同等の効果が得られる。

産業上の利用可能性

本発明の窒化ガリウム系半導体発光素子は、光ディスク等の情報処理用として使用される半導体レーザ素子や、大型カラー表示装置等のための半導体発光ダイオード素子として用いられるものであり、さらに半導体レーザ素子に電流を注入するための駆動回路と組み合わせれば、たとえば光ディスクのデータ読み出し用の半導体レーザ光源装置としても用いられる。

請 求 の 範 囲

1. 半導体基板（1, 21）と、少なくともインジウムとガリウムを含む窒化物半導体からなる量子井戸構造を有する活性層（6, 26, 46, 76）と、上記活性層を挟み込む第1のクラッド層（5, 25）および第2のクラッド層（9, 29）とを備え、

前記活性層（6, 26, 46, 76）は、2つの量子井戸層（14, 34）と、前記量子井戸層の間に挟まれた1つの障壁層（15, 35, 55, 85）とを備えることを特徴とする窒化ガリウム系半導体発光素子。

2. 前記活性層（6, 26）は、前記2つの量子井戸層（14, 34）と、前記量子井戸層の間に挟まれた1つの障壁層（15, 35）のみからなることを特徴とする請求項1に記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

3. 前記障壁層（15, 35）の層厚は10 nm以下であることを特徴とする請求項2に記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

4. 前記障壁層（15, 35）の層厚は4 nm以下であることを特徴とする請求項1乃至3のいずれか1つに記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

5. 各量子井戸層（14, 34）の厚さが10 nm以下であることを特徴とする請求項1乃至4のいずれか1つに記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

6. 前記活性層(46, 76)は1つまたは2つの付加量子井戸層(54, 84)と、この付加量子井戸層(54, 84)と交互に積層されたこの付加量子井戸層と同数の障壁層(55, 85)とをさらに備えており、この活性層(46, 76)中の各障壁層(55, 85)は4 nm以下の層厚を有することを特徴とする請求項1, 3, 4, 5のいずれか1つに記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

7. 前記窒化ガリウム系半導体発光素子は半導体レーザ素子であり、前記活性層(6, 46)はこの半導体レーザ素子の発振部を形成することを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1つに記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

8. 前記半導体レーザ素子は自励発振型半導体レーザ素子であることを特徴とする請求項7に記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

9. 前記窒化ガリウム系半導体発光素子は半導体発光ダイオード素子であり、前記活性層(26, 76)はこの半導体発光ダイオード素子の発光部を形成することを特徴とする請求項1乃至6のいずれか1つに記載の窒化ガリウム系半導体発光素子。

10. 請求項7に記載の半導体レーザ素子と、この半導体レーザ素子に電流を注入する駆動回路(17, 19)とを備えたことを特徴とする半導体レーザ光源装置。

11. 前記電流は変調された電流であり、その電流の変調周波数が、30

0 MHz 以上であることを特徴とする請求項 10 に記載の半導体レーザ光源装置。

Fig. 1

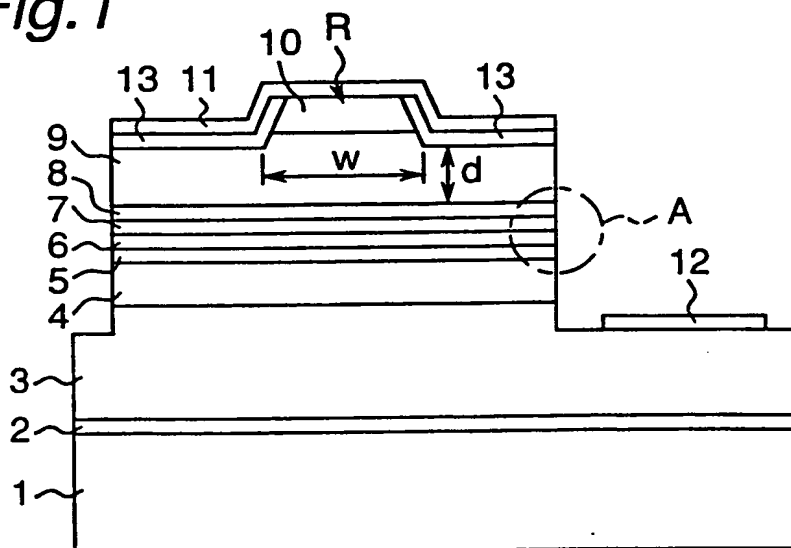


Fig. 2

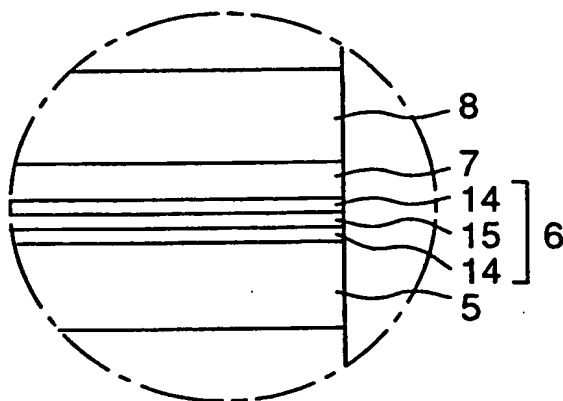


Fig.3

光出力の変調可能な周波数
(最大周波数=●)

閾値電流 (○)

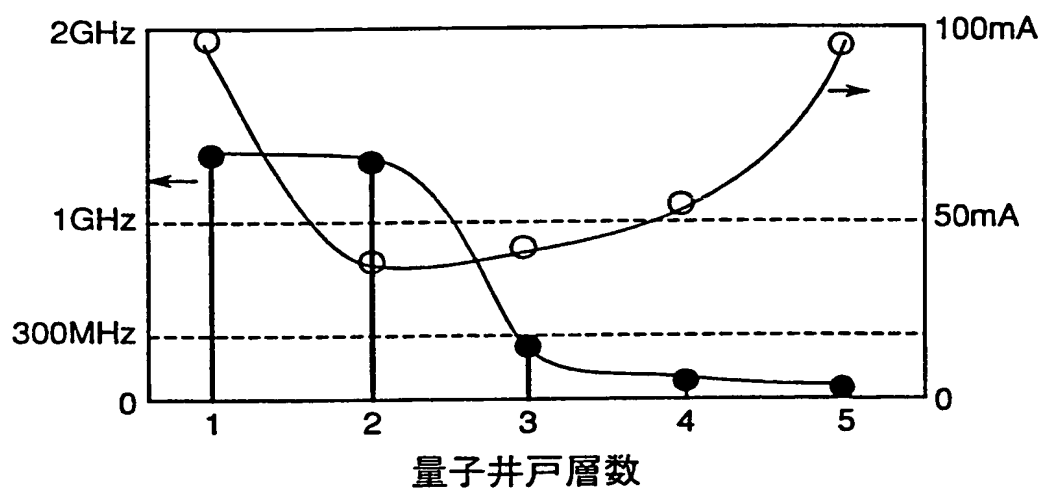


Fig.4

光出力の変調可能な最大周波数

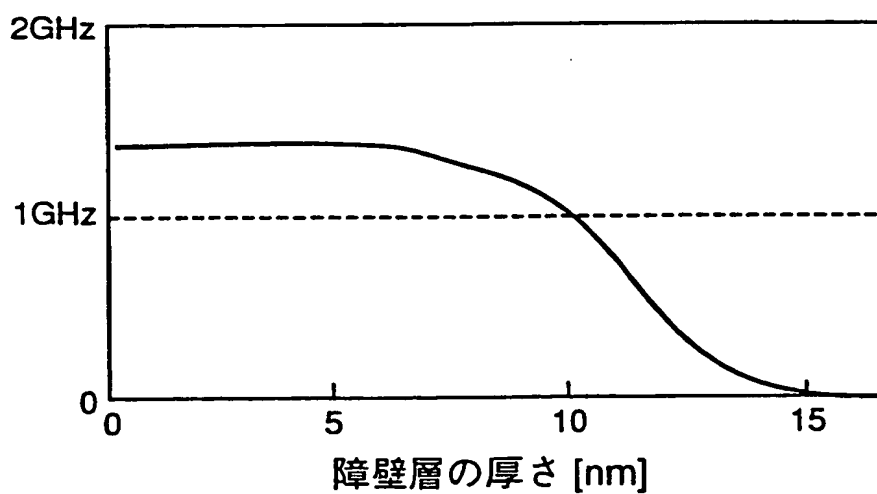


Fig.5

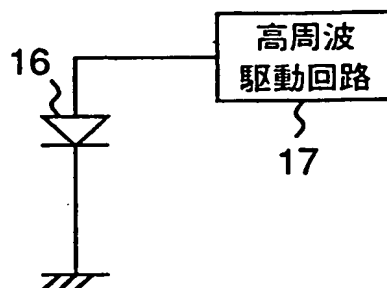


Fig.6

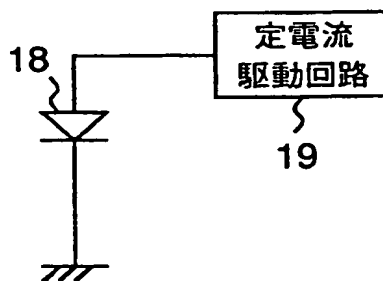


Fig.7

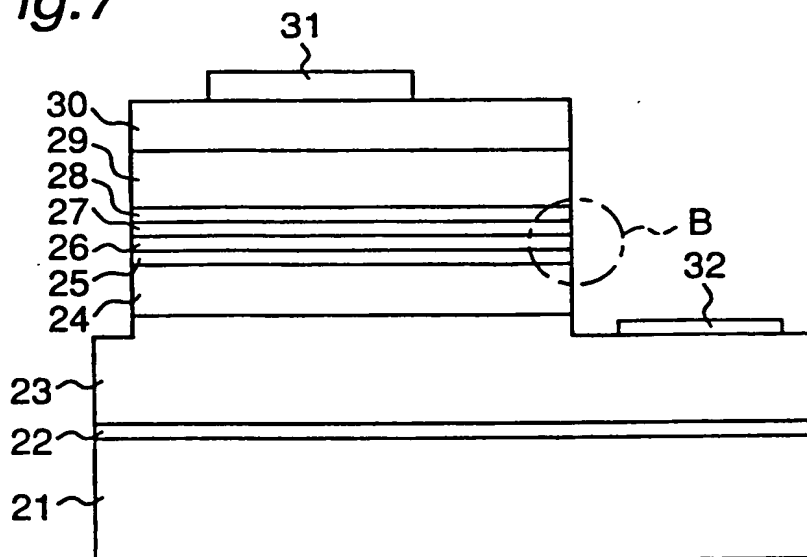


Fig.8

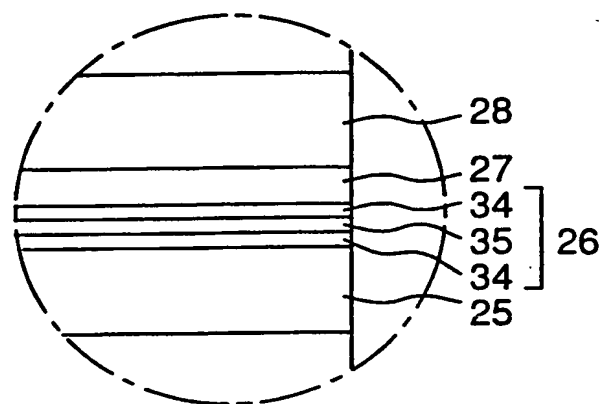


Fig.9

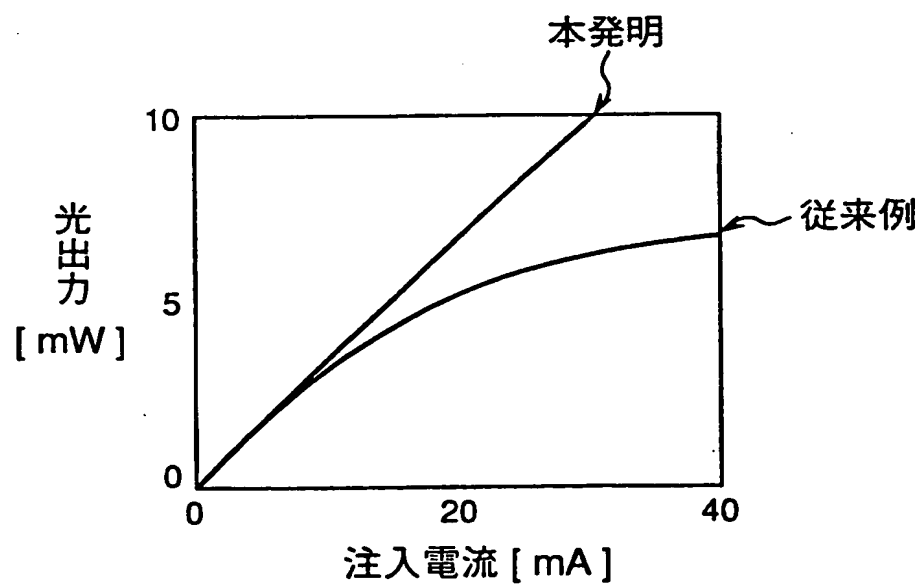


Fig.10

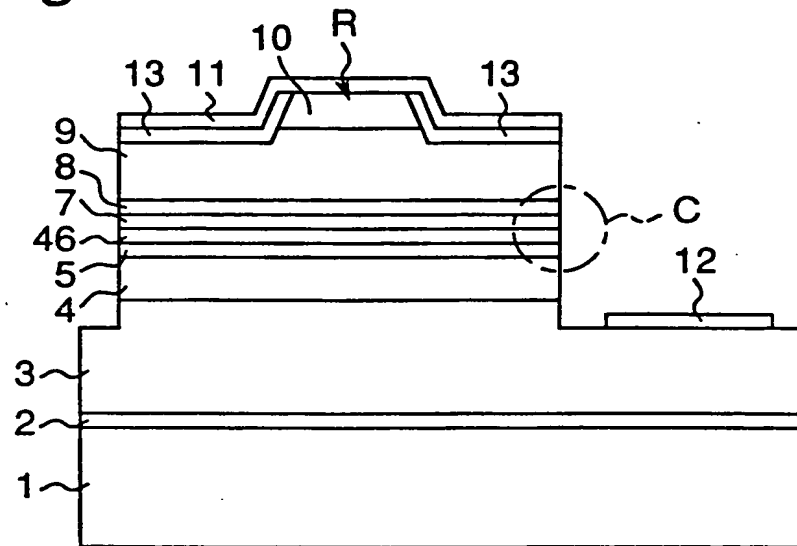


Fig.11

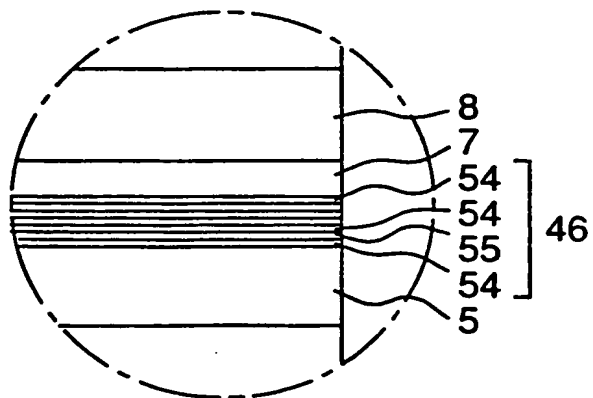


Fig. 12

光出力の変調可能な周波数
(最大周波数=●)

閾値電流 (○)

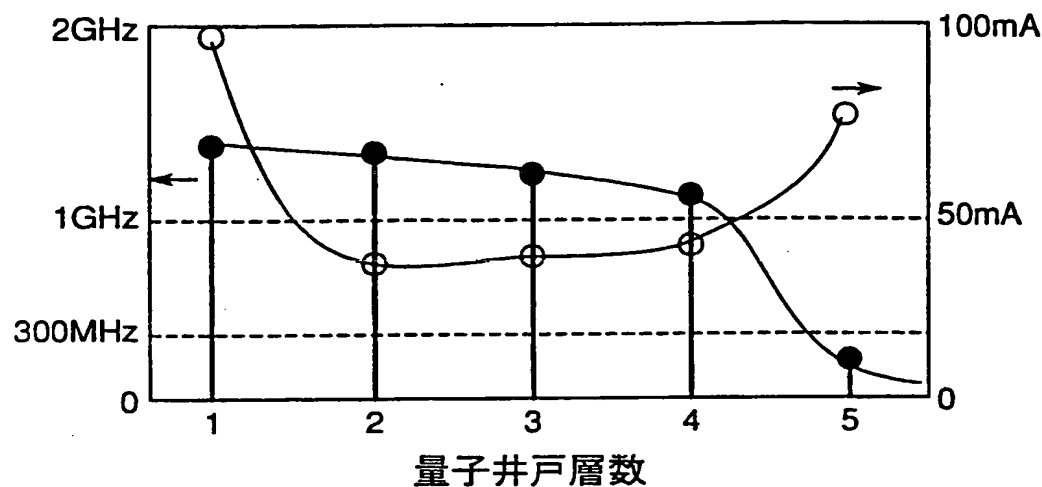


Fig. 13

光出力の変調可能な最大周波数

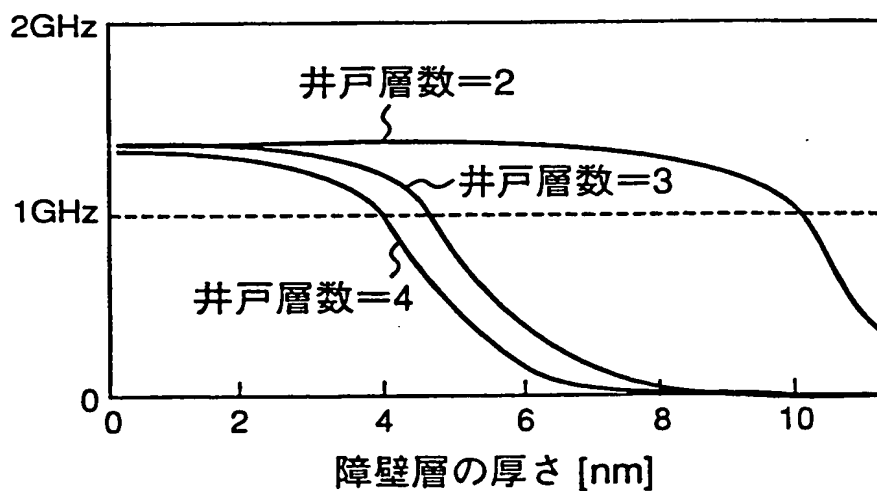


Fig. 14

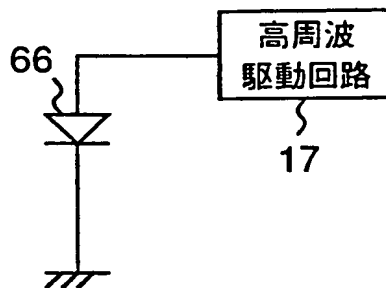


Fig. 15

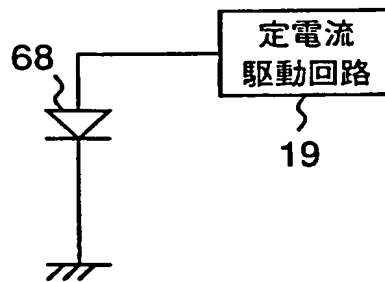


Fig. 16

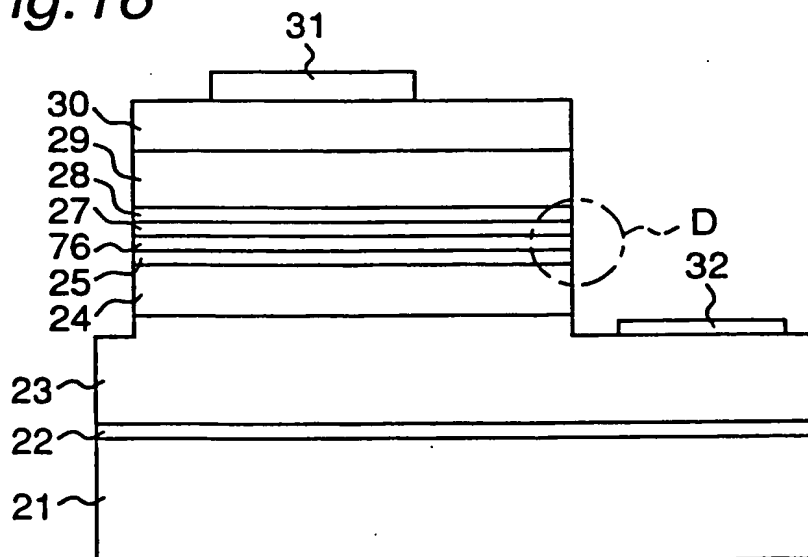


Fig.17

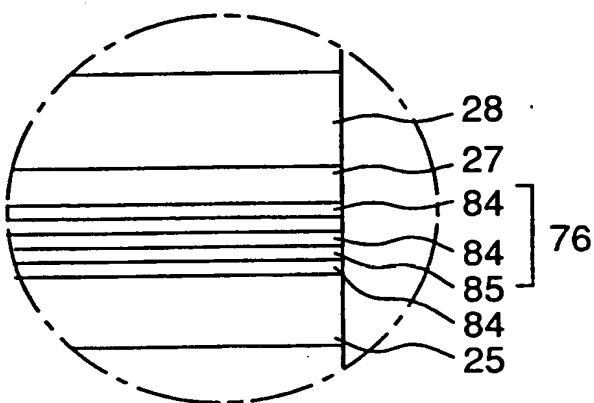


Fig.18

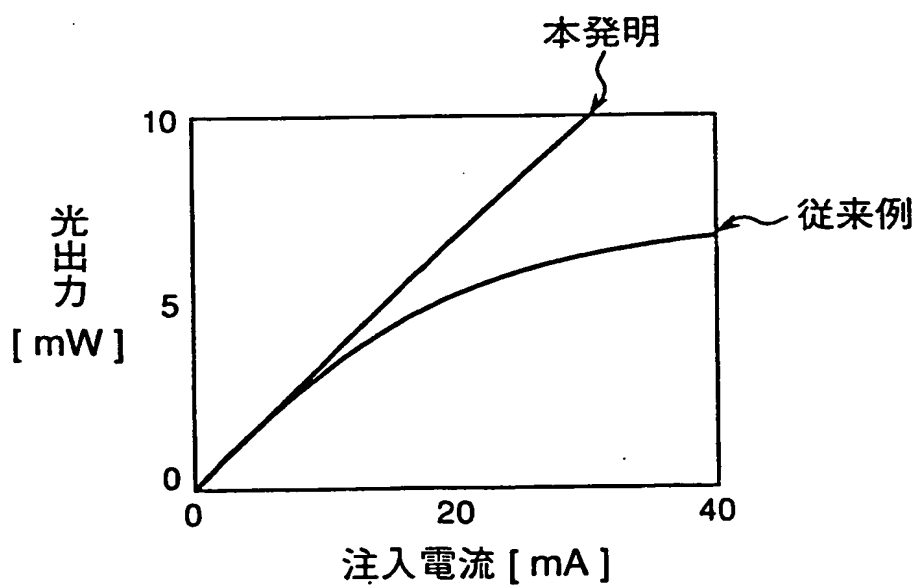


Fig.19

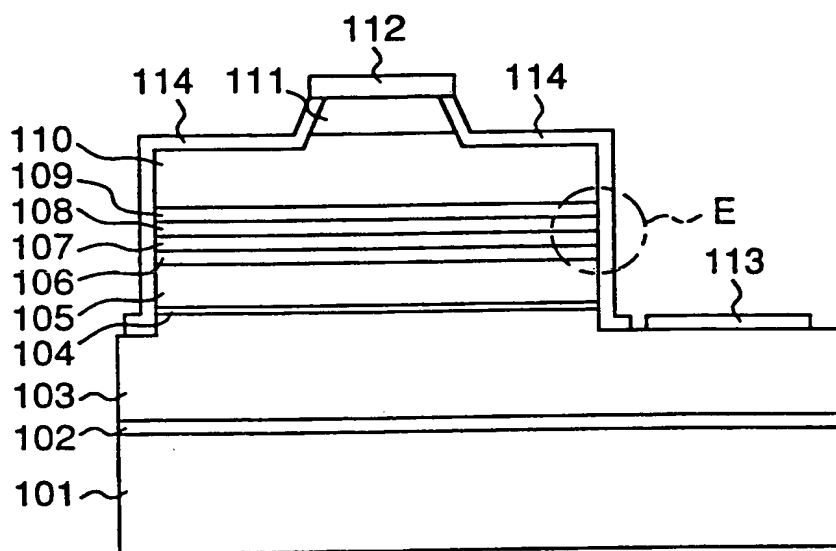


Fig.20

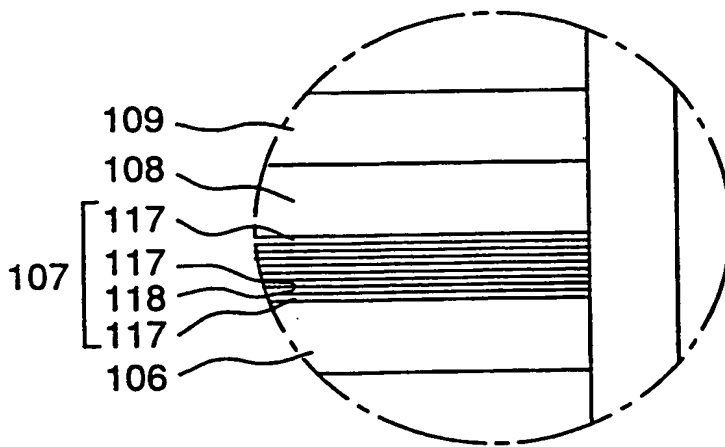
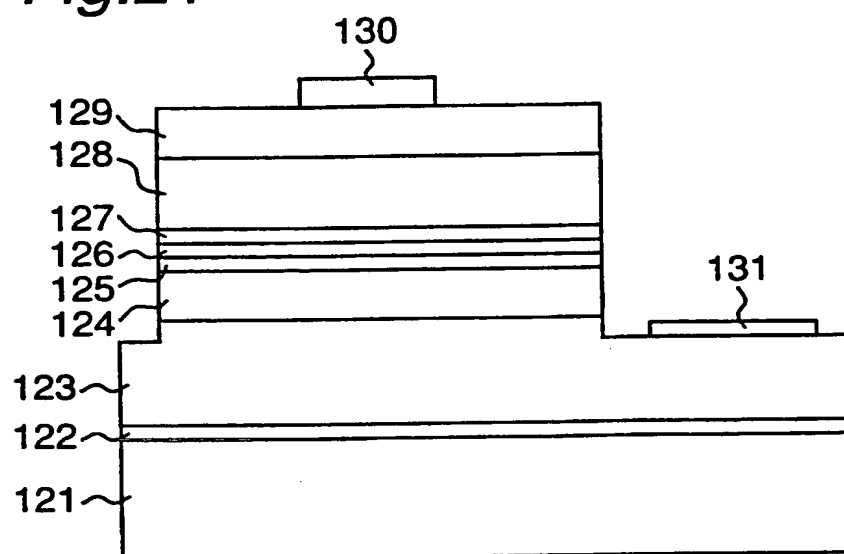


Fig.21



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP98/00828

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl⁶ H01S3/18, H01L33/00

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl⁶ H01S3/18, H01L33/00

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-1998
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-1998 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-1998

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	JP, 9-36430, A (Nichia Chemical K.K.), February 7, 1997 (07. 02. 97), Column 11, line 20 to column 12, line 37, column 38, line 47 to column 39, line 11,	1-7, 9
Y	Full text & EP, 716457, A & CN, 1132942, A	10
P, X	JP, 9-116225, A (Hitachi, Ltd.), May 2, 1997 (02. 05. 97), Column 3, lines 33 to 48 ; Fig. 1 (Family: none)	1, 3, 5, 7
A	JP, 8-330680, A (Sharp Corp.), December 13, 1996 (13. 12. 96), Full text & EP, 746067, A & GB, 2301708, A	8, 11
P, A	JP, 9-191160, A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), July 22, 1997 (22. 07. 97), Full text (Family: none)	8

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier document but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
May 26, 1998 (26. 05. 98)

Date of mailing of the international search report
June 2, 1998 (02. 06. 98)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP98/00828

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP, 8-316563, A (Sanyo Electric Co., Ltd.), November 29, 1996 (29. 11. 96), Full text (Family: none)	8
A	JP, 8-264902, A (Sanyo Electric Co., Ltd.), October 11, 1996 (11. 10. 96), Full text (Family: none)	8
A	JP, 63-257286, A (Hitachi, Ltd. and another), October 25, 1988 (25. 10. 88), Full text (Family: none)	11

国際調査報告

国際出願番号 PCT/J P 98/00828

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl. ⁸ . H01S 3/18, H01L 33/00		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC)) Int. Cl. ⁸ . H01S 3/18, H01L 33/00		
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922-1996年 日本国公開実用新案公報 1971-1998年 日本国登録実用新案公報 1994-1998年 日本国実用新案登録公報 1996-1998年		
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
X	J P、9-36430、A (日亜化学工業株式会社) 7. 2月. 1997 (07. 02. 97) 第11欄第20行-第12欄第37行、 第38欄第47行-第39欄第11行	1-7, 9
Y	全文 & E P、716457、A & C N、1132942、A	10
P, X	J P、9-116225、A (株式会社日立製作所) 2. 5月. 1997 (02. 05. 97) 第3欄第33行-48行、図1 (ファミリーなし)	1, 3, 5, 7
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」 先行文献ではあるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す) 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」 同一パテントファミリー文献		
国際調査を完了した日 26. 05. 98	国際調査報告の発送日 02.06.98	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号 100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 門田 かづよ 印	2 K 9512
電話番号 03-3581-1101 内線 3255		

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	J P、8-330680、A (シャープ株式会社) 13. 12月. 1996 (13. 12. 96) 全文 & E P、746067、A & G B、2301708、A	8, 11
P, A	J P、9-191160、A (松下電器産業株式会社) 22. 7月. 1997 (22. 07. 97) 全文 (ファミリーなし)	8
A	J P、8-316563、A (三洋電機株式会社) 29. 11月. 1996 (29. 11. 96) 全文 (ファミリーなし)	8
A	J P、8-264902、A (三洋電機株式会社) 11. 10月. 1996 (11. 10. 96) 全文 (ファミリーなし)	8
A	J P、63-257286、A (株式会社日立製作所 外1名) 25. 10月. 1988 (25. 10. 88) 全文 (ファミリーなし)	11
<p>Inventor: SAWAZAKI et al. Appln. No.: 09/522,832 Matter No.: 257760 FOR: GROUP III NITRIDE COMPOUND SEMICONDUCTOR ...</p> <p>PILLSBURY WINTHROP LLP MCLEAN, VA</p>		